

# Modelowanie procesu regulacji anemometru stałotemperaturowego do pomiarów w przepływach szybkozmiennych

PAWEŁ LIGĘZA

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Typowym układem pracy anemometru z grzanym włóknem jest układ stałotemperaturowy. Jest to elektroniczny układ automatycznej regulacji, który utrzymuje średnią temperaturę włókna czujnika na stałym, zadanym poziomie. Układ stałotemperaturowy zawiera mostek komparacji rezystancji oraz regulator pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego. W takim układzie prąd czujnika jest funkcją strat cieplnych włókna pomiarowego, a więc pośrednio mierzonej prędkości przepływu. Anemometr stałotemperaturowy umożliwia pomiar szybkozmiennych fluktuacji prędkości przepływu, jednak pasmo przenoszenia jest funkcją parametrów układu, oraz współczynnika nagrzania włókna i prędkości przepływu. Dobór parametrów i regulacja układu stałotemperaturowego umożliwiają kształtowanie i optymalizację pasma przenoszenia anemometru do pomiarów w szybkozmiennych przepływach turbulentnych. W pracy przedstawiono model matematyczny anemometru stałotemperaturowego oraz badania symulacyjne obrazujące kształtowanie pasma przenoszenia i metodykę optymalnej regulacji anemometru. Artykuł stanowi pierwszą część cyklu poświęconego tematyce pomiarów termooanemometrycznych w przepływach szybkozmiennych.

**Słowa kluczowe:** anemometr stałotemperaturowy, model matematyczny, symulacja komputerowa, pasmo przenoszenia

## 1. Wprowadzenie

Tematyka związana z zastosowaniem termooanemometrów w pomiarach przepływów szybkozmiennych i turbulentnych była podejmowana w literaturze wielokrotnie. Teorię anemometru stałotemperaturowego jako układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym podał Freymuth [1]. Teoria ta ogranicza się do analizy pracy układu dla małych sygnałów. Pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego poddał analizie w swojej pracy Davis [2]. Badał on prosty model dynamiczny drugiego rzędu. Freymuth w pracy [3] zaproponował metodę testowania pasma przenoszenia termooanemometru za pomocą elektrycznego sygnału prostokątnego, oraz podał zależność pozwalającą na oszacowanie częstotliwości granicznej układu. Freymuth w [3] wykazał także, że poprawnie zestrojony anemometr może być dobrze opisany modelem dynamicznym trzeciego rzędu. Komputerową symulację pracy złożonych systemów termooanemometrycznych przedstawił w swojej pracy Watmuff [4]. Określił on czynniki decydujące o paśmie przenoszenia anemometru. Zachowanie anemometru w zakresie bardzo wysokich częstotliwości analizowali w swojej pracy Saddoughi i Veeravalli [5]. Wykazali oni, że pasmo przenoszenia jest limitowane przez szumy własne układu. Krytyczny przegląd literatury anemometrycznej dotyczącej efektów dynamicznych rzędu wyższego niż trzeci podał Freymuth [6]. Natomiast Payne [7] zaprezentował teoretyczną analizę częstotliwościowej odpowiedzi anemometru. Wykazał on, że ze względu na istnienie przewodzenia ciepła z włókna do wsporników istnieje konieczność korekcji charakterystyki częstotliwościowej anemometru już dla częstotliwości rzędu pojedynczych herców. Efekt ten analizował w swojej pracy także Li [8]. Ponadto badał on także wpływ elementów elektronicznych na częstotliwość graniczną układu [9], oraz różne rodzaje wymuszeń stosowanych do wyznaczenia pasma przenoszenia anemometru [10].

Typowym układem pracy anemometru z grzanym włóknem jest układ stałotemperaturowy. Jest to elektroniczny układ automatycznej regulacji, który utrzymuje średnią temperaturę włókna czujnika na stałym, zadanym poziomie. Układ stałotemperaturowy zawiera układ komparacji rezystancji oraz regulator pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego. W takim układzie prąd czujnika jest funkcją strat cieplnych włókna pomiarowego, a więc pośrednio mierzonej prędkości przepływu. Pomiar przepływów szybkozmiennych i turbulentnych wymagają dokonania regulacji właściwości dynamicznych anemometru stałotemperaturowego, mającej na celu kształtowanie pasma przenoszenia anemometru. Kształtowanie pasma przenoszenia może być zrealizowane w następujących trybach:

- manualna regulacja pasma przenoszenia anemometru,
- automatyczna regulacja pasma przenoszenia anemometru,
- regulacja adaptacyjna anemometru.

W termoanemometrycznych komputerowych systemach pomiarowych regulacja pasma przenoszenia może być dokonywana automatycznie. System pomiarowy na podstawie analizy sygnału mierzonego dobiera nastawy układu stałotemperaturowego optymalnie do warunków pomiarowych. Możliwe jest także wprowadzenia do układu stałotemperaturowego regulatora adaptacyjnego działającego w taki sposób, aby uzyskać możliwie stałe pasmo przenoszenia anemometru w funkcji prędkości przepływu. Jest to realizowane poprzez zastosowanie drugiej pętli sprzężenia zwrotnego. W pętli tej sygnał wyjściowy z anemometru steruje parametrami regulatora tak, aby zarówno dla małych jak i dla dużych prędkości pasmo przenoszenia było zbliżone.

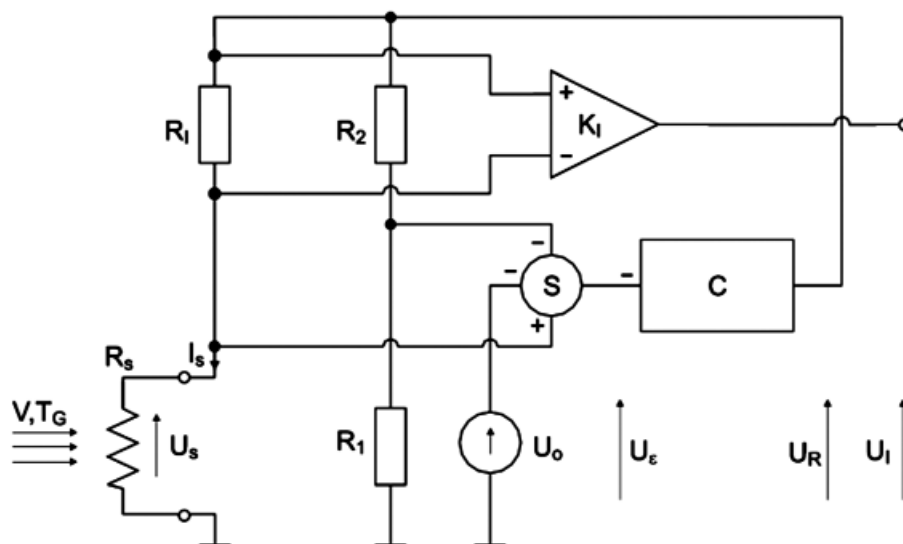
Niezależnie od zastosowanej metody kształtowania pasma, regulację anemometru stałotemperaturowego przeprowadza się najczęściej w taki sposób, aby dla największej mierzonej prędkości uzyskać możliwie szerokie pasmo przenoszenia, przy zapewnieniu płaskiej charakterystyki częstotliwościowej oraz stabilnej pracy anemometru. Regulacja anemometru jest prowadzona standardowo na podstawie testu z wymuszeniem elektrycznym w postaci fali prostokątnej doprowadzonej do układu stałotemperaturowego. Kształt i parametry odpowiedzi układu pozwala na ocenę pasma przenoszenia. Model matematyczny anemometru stałotemperaturowego oraz przeprowadzone symulacyjne badania modelowe opisane w dalszej części pracy pozwalają na ocenę jakości procesu regulacji anemometru na podstawie testu z wymuszeniem elektrycznym.

## 2. Mostkowy anemometr stałotemperaturowy jako układ regulacji automatycznej

Stałotemperaturowy układ zasilania czujnika anemometrycznego wymusza przepływ przez włókno czujnika prądu elektrycznego o takiej wartości, aby jego rezystancja, a więc także temperatura była utrzymywana, niezależnie od zewnętrznych warunków odbierania ciepła, na stałej, zadanej wartości. Umożliwia on także pomiar wielkości elektrycznych związanych z zasilaniem czujnika stanowiących sygnały wyjściowe z układu. Sygnałem takim jest najczęściej napięcie proporcjonalne do prądu czujnika lub napięcia na czujniku. W układzie stałotemperaturowym prąd czujnika rośnie ze wzrostem prędkości bez ograniczeń asymptotycznych. Czułość układu pomiarowego maleje ze wzrostem prędkości, nie zmierza jednak asymptotycznie do zera. Najczęściej stosowanym układem stałotemperaturowego zasilania czujnika termoanemometrycznego jest klasyczny układ mostkowy. Alternatywnym rozwiązaniem jest opracowany przez autora bezmostkowy układ stałotemperaturowy z czteropunktowym zasilaniem czujnika pomiarowego. Rozwinięciem tego układu jest sterowany układ stałotemperaturowy, w którym wartość rezystancji czujnika jest zadawana zewnętrznym sygnałem cyfrowym [11].

Klasyczny tor pomiarowy anemometru stałotemperaturowego pracującego w układzie mostkowym przedstawia rysunek 1.

Anemometr stałotemperaturowy zawiera mostkowy układ komparacji rezystancji oraz regulator pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego i stanowi układ automatycznej regulacji. Elementem pomiarowym jest czujnik anemometryczny z grzanym włóknem  $R_S$  umieszczony w badanym przepływie medium o prędkości  $V$  i temperaturze  $T_G$ . Czujnik ten wraz z elementami  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  tworzą mostek rezystancyjny. Sygnał z przekątnej mostka poprzez sumator  $S$  steruje za pomocą napięcia błędu  $U_e$  pracą regulatora  $C$ . Zadaniem regulatora jest wytwarzanie takiego napięcia  $U_R$  zasilającego mostek, aby poprzez nagrzanie czujnika  $R_S$  utrzymywać mostek możliwie blisko stanu równowagi. Dodatkowym elementem w układzie jest źródło napięcia niezrównoważenia  $U_0$ . Element ten umożliwia start układu w chwili załączenia oraz wpływa na parametry statyczne i dynamiczne układu. Ponadto modulacja napięcia  $U_0$  periodycznym sygnałem prostokątnym umożliwia badanie i przeprowadzenie regulacji właściwości dynamicznych anemometru.



Rys. 1. Anemometr stałotemperaturowy w układzie mostkowym

W stanie ustalonym regulator sprowadza napięcie błędu  $U_\epsilon$  do zera, wówczas spełniona jest zależność:

$$U_R \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) - U_0 = 0 \quad (1)$$

Przyjmując, że napięcie niezrównoważenia  $U_0$  jest bliskie zera układ taki utrzymuje rezystancję, a co za tym idzie temperaturę czujnika na stałym, zadanym poziomie zgodnie z zależnością:

$$R_S = R_I \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

Sygnałem wyjściowym z układu stałotemperaturowego w przedstawionym rozwiązaniu jest napięcie:

$$U_I = K_I R_I I_S \quad (3)$$

proporcjonalne do prądu czujnika  $I_S$ . Wykorzystano tu wzmacniacz różnicowy  $K_I$  wzmacniający napięcie na rezystorze  $R_I$ .

### 3. Model anemometru stałotemperaturowego do badań symulacyjnych

W celu przeprowadzenia badań modelowych opracowano dynamiczny model matematyczny anemometru stałotemperaturowego. Ponieważ w badaniach modelowych parametry przepływu i układu mogą zmieniać się w szerokim zakresie, autor proponuje model nieliniowy w dziedzinie czasu. Model matematyczny układu pomiarowego z rysunku 1 opracowano w oparciu o równania opisujące jego elementy składowe. Wyróżniono trzy składniki determinujące model układu: czujnik z grzonym włóknem, układ komparacji rezystancji oraz regulator. Oznaczenia przyjęto zgodnie z przedstawionymi na rysunku 1.

Do opisu czujnika anemometrycznego z grzonym włóknem przyjęto równanie w postaci zaproponowanej w pracy [12]:

$$I_S^2 R_S = I_L^2 (R_S - R_{SG}) \left[ 1 + \left( \frac{V}{V_L} \right)^n \right] + I_L^2 \tau_L \frac{dR_S}{dt} \quad (4)$$

gdzie:

- $I_L, V_L, \tau_L, n$  – parametry modelu,
- $R_{SG}$  – rezystancja czujnika w temperaturze medium,
- $t$  – czas.

Jest to zunifikowana postać modelu matematycznego czujnika z grzanym włóknem o parametrach zdefiniowanych odmiennie niż w dotychczasowej literaturze anemometrycznej. Parametry te bezpośrednio opisują podstawowe właściwości metrologiczne czujnika, mają jednoznaczny wymiar i prostą interpretację fizyczną.

Parametr  $I_L$  ma wymiar prądu, a jego wartość jest hipotetycznym prądem czujnika przy którym, dla zerowej prędkości, współczynnik nagrzania czujnika:

$$\eta = \frac{R_S}{R_{SG}} \quad (5)$$

dąży do nieskończoności. Dla prądu czujnika  $I_S = I_L / \sqrt{2}$ , dla zerowej prędkości, współczynnik nagrzania  $\eta = 2$ .

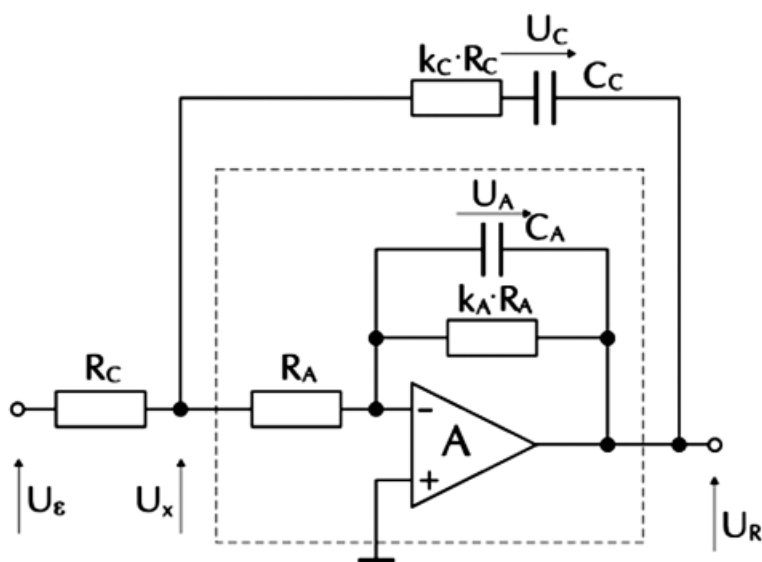
Parametr  $V_L$  ma wymiar prędkości, wymiar ten nie zależy od wartości wykładnika  $n$ . Przy prędkości  $V = V_L$  dla zachowania zadanego współczynnika nagrzania prąd czujnika jest  $\sqrt{2}$  razy większy w porównaniu z prądem dla  $V = 0$ .

Właściwości dynamiczne czujnika opisuje parametr  $\tau_L$ . Dla zerowej prędkości przepływu i stałego prądu czujnika o wartości  $I_S = I_L$  rezystancja czujnika narasta liniowo, a w czasie  $\tau_L$  podwaja swoją wartość.

Zadaniem mostkowego układu komparacji rezystancji jest porównanie rezystancji czujnika z wartością zadaną i wytworzenie sygnału błędu. Układ ten opisuje równanie przedstawiające zależność napięcia błędu  $U_\varepsilon$  z węzła sumacyjnego  $S$  od napięcia zasilającego mostek. Zgodnie z rysunkiem 1 układ komparacji rezystancji opisuje zależność:

$$U_\varepsilon = U_R \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) - U_0 \quad (6)$$

Opis matematyczny regulatora wymaga określenia jego typu. W układzie można zastosować różnorodne typy regulatorów: regulator proporcjonalny P, regulator proporcjonalno – całkujący PI oraz proporcjonalno – całkująco – różniczkujący PID, a także rozbudowane regulatory realizujące złożone algorytmy. Do analizy układu autor przyjął strukturę regulatora PI zbudowanego na pojedynczym wzmacniaczu operacyjnym, przy czym uwzględniono rzeczywiste właściwości wzmacniacza operacyjnego. Układ taki jest stosowany przez autora w praktycznych realizacjach anemometrów stałotemperaturowych. Schemat zastępczy regulatora przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy rzeczywistego regulatora proporcjonalno-całkującego PI

Linia przerywaną wyróżniono schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego. Dla wzmacniacza operacyjnego przyjęto model inercyjny pierwszego rzędu uwzględniający skończoną rezystancję wejściową, ograniczone wzmocnienie i inercję. Dla rozpatrywanych zagadnień model ten stanowi dobre przybliżenie rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego. Wzmacniacz wraz z zewnętrznymi elementami  $R$  i  $C$  realizuje

funkcję regulatora proporcjonalno – całkującego. Oznaczając stałą czasową modelu inercyjnego wzmacniacza operacyjnego:

$$\tau_A = k_A R_A C_A \quad (7)$$

oraz stałą czasową integratora:

$$\tau_C = k_C R_C C_C \quad (8)$$

regulator przedstawiony na rysunku 3 opisuje układ równań:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{(-k_C R_C - k_C R_A)U_C + (k_C R_C + k_C R_A)U_R - k_C R_A U_\varepsilon}{\tau_C (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (9)$$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{k_A R_A U_C - (k_A R_A + k_C R_C + k_C R_A + R_A)U_R - k_A k_C R_A U_\varepsilon}{\tau_A (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (10)$$

Jako zmienne stanu do opisu anemometru stałotemperaturowego przyjęto napięcia  $U_R$  i  $U_C$  oraz rezystancję czujnika  $R_S$ . Uwzględniając równanie opisujące czujnik (4), równanie układu komparacji rezystancji (6) oraz równania regulatora (9), (10) otrzymujemy układ równań opisujący anemometr stałotemperaturowy w postaci:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{(-k_C R_C - k_C R_A)U_C + \left( k_C R_C + k_C R_A - k_C R_A \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \right) U_R + k_C R_A U_0}{\tau_C (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (11)$$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{k_A R_A U_C - \left( k_A R_A + k_C R_C + k_C R_A + R_A - k_A k_C R_A \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \right) U_R + k_A k_C R_A U_0}{\tau_A (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (12)$$

$$\frac{dR_S}{dt} = \frac{\frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_I)^2} - (R_S - R_{SG}) \left[ 1 + \left( \frac{V}{V_L} \right)^n \right]}{\tau_L} \quad (13)$$

Jako równanie wyjścia przyjmujemy zależność prędkości  $v$  mierzonej przez anemometr od zmiennych stanu:

$$v = V_L \left( \frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_I)^2 (R_S - R_{SG})} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

Powyższe równania wraz z warunkami początkowymi dla zmiennych stanu stanowią model matematyczny anemometru stałotemperaturowego i pozwalają na przeprowadzenie jego badań modelowych. Dodatkowo wartość prądu czujnika możemy wyznaczyć ze zmiennych stanu zgodnie z zależnością:

$$I_S = \frac{U_R}{R_S + R_I} \quad (15)$$

#### 4. Kształtowanie pasma przenoszenia i regulacja anemometru stałotemperaturowego

Celem badań modelowych jest ocena jakości procesu regulacji anemometru na podstawie testu ze skokowym wymuszeniem elektrycznym, oraz wyznaczenie pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego. Badania przeprowadzono metodą wielokrotnego rozwiązywania układu równań stanowiącego

model anemometru. Proces taki jest symulacją pracy układu. Wykorzystano tu środowisko MATLAB. Do rozwiązywania układu równań różniczkowych zastosowano metodę Rungego-Kutty piątego rzędu. Przebieg symulacji polegał na wyznaczeniu stanu ustalonego dla danego zbioru parametrów, a następnie wyznaczeniu odpowiedzi układu dla zadanego wymuszenia. Jako wymuszenie stosowano skokową funkcję napięcia niezrównoważenia  $U_0$  układu stałotemperaturowego. Badano przebieg prądu czujnika (15) przy skokowym wzroście napięcia niezrównoważenia  $U_0$  do zadanej wartości, a następnie przy spadku do wartości początkowej. Zgodnie z danymi literaturowymi [3] na podstawie takiego testu napięciowego można wyznaczyć pasmo przenoszenia anemometru zgodnie z zależnością:

$$f_U = \frac{1}{1.3 \tau_U} \quad (16)$$

gdzie:  $\tau_U$  – jest czasem ustalania się odpowiedzi anemometru mierzonym od początku wymuszenia do spadku odpowiedzi do wartości 3% jej maksymalnej wartości.

Literatura [3] zaleca taką regulację anemometru, aby uzyskać przeregulowanie odpowiedzi układu na poziomie 15% amplitudy skoku. Pozwala to na uzyskanie optymalnego pasma przenoszenia anemometru. Pasma przenoszenia w oparciu o (16) wyznaczane jest metodą pośrednią, łatwą do zastosowania w rzeczywistym przyrządzie pomiarowym. Aby uzyskać referencyjne wartości pasma przenoszenia dla tej metody, wyznaczano również w badaniach modelowych pasmo przenoszenia anemometru zgodnie z definicją. W tym celu przeprowadzono badania symulacyjne przy zastosowaniu sinusoidalnej funkcji zmiany prędkości  $V$  w czasie w postaci:

$$V = V_M + \Delta V \sin(2\pi ft) \quad (17)$$

gdzie:

- $V_M$  – prędkość średnia,
- $\Delta V$  – amplituda wymuszenia,
- $f$  – częstotliwość wymuszenia,
- $t$  – czas.

Na podstawie modelu (11) do (14) wyznaczano amplitudę i przesunięcie fazowe prędkości mierzonej  $v$  względem wymuszenia  $V$  dla różnych częstotliwości  $f$ . Jako parametr określający pasmo przenoszenia anemometru przyjęto częstotliwość graniczną  $f_V$ , dla której amplituda odpowiedzi układu spada o 3 dB względem wymuszenia. Ten definicyjny sposób wyznaczania pasma przenoszenia anemometru jest praktycznie niemożliwy do przeprowadzenia w rzeczywistym przyrządzie pomiarowym, ze względu na trudności z uzyskaniem wzorcowego sygnału testującego (17). Dlatego istotnym zagadnieniem jest porównanie obu metod w oparciu o badania symulacyjne.

Do obliczeń przyjęto parametry czujnika i układu zbliżone do stosowanych w układach rzeczywistych. Dla czujnika przyjęto typowe parametry czujnika z włóknem wolframowym o średnicy 5 mikrometrów. Parametry te zebrano w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry czujnika anemometrycznego

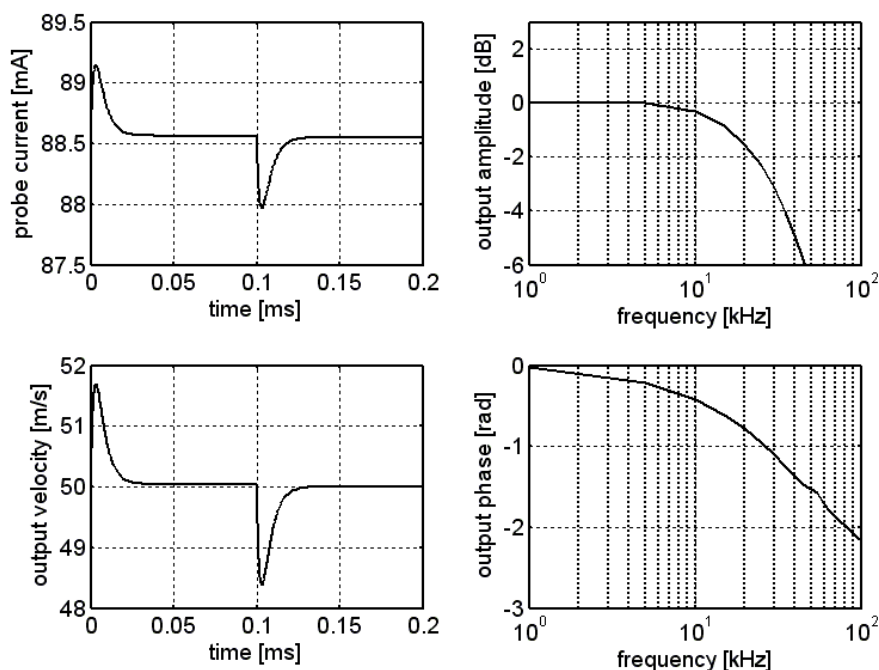
$R_{SG}$	$T_G$	$\alpha_G$	$I_L$	$V_L$	$\tau_L$	$n$
[ $\Omega$ ]	[K]	[1/K]	[A]	[m/s]	[s]	
5	293	$3.33 \times 10^{-3}$	$59.2 \times 10^{-3}$	3.06	$1.14 \times 10^{-3}$	0.5

Natomiast parametry układu przedstawiono w tabeli 2, przy czym dla wzmacniacza operacyjnego regulatora przyjęto parametry wzmacniacza operacyjnego OP27. Wzmacniacz ten jest często stosowany w rzeczywistych układach anemometru stałotemperaturowego.

Tab. 2. Parametry układu elektronicznego

$R_1$	$R_2$	$\eta$	$U_0$	$R_A$	$k_A$	$\tau_A$	$R_C$
[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]		[V]	[ $\Omega$ ]		[s]	[ $\Omega$ ]
10	100	1.8 (1.1-2.2)	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	$10 \times 10^{-3}$	100

Przeprowadzone badania obrazują optymalną regulację anemometru przy współczynniku nagrzania  $\eta = 1.8$  i prędkości  $V = 50$  m/s. Parametry regulatora  $k_C$ ,  $\tau_C$  dobierano w procesie optymalizacji tak, aby uzyskać przeregulowanie odpowiedzi układu na skok napięcia niezrównoważenia na poziomie 15% amplitudy skoku. Odpowiada to uzyskaniu optymalnego pasma przenoszenia anemometru przy zadanych warunkach pracy. Optymalne parametry regulatora dla badanego układu dobrane w procesie regulacji wynoszą  $k_C = 300$ ,  $\tau_C = 150 \times 10^{-6}$  s. Przebieg procesu regulacji przedstawiono na wykresach.



Rys. 3. Proces regulacji anemometru – wzmacnienie regulatora mniejsze od optymalnego

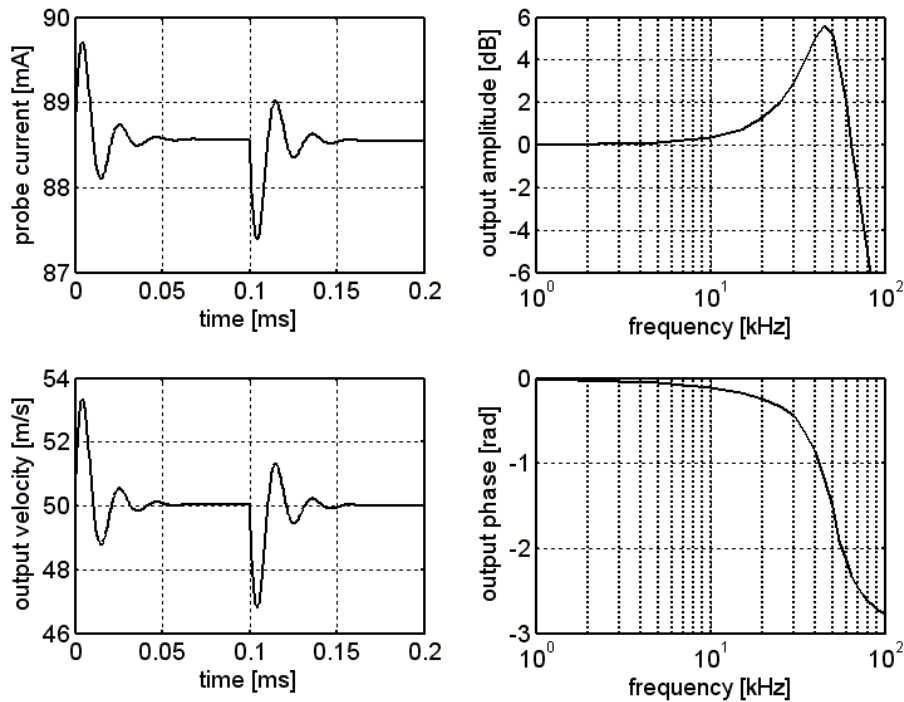
Rysunek 3 przedstawia proces regulacji anemometru dla wzmacnienia regulatora o połowę mniejszego od wartości optymalnej, przy optymalnej stałej czasowej. Po lewej stronie rysunku przedstawiono przebieg odpowiedzi anemometru na skokowe wymuszenie napięcia niezrównoważenia o amplitudzie 0.1 mV. Odpowiedź anemometru obrazuje prąd czujnika oraz odpowiadająca mu prędkość mierzona wyznaczona zgodnie z przyjętym modelem. Po prawej stronie rysunku przedstawiono amplitudę i przesunięcie fazowe prędkości mierzonej  $v$  względem sinusoidalnie zmiennego wymuszenia  $V$  dla zmiennej częstotliwości  $f$ . Odpowiedź skokowa jest aperiodyczna bez przeregulowania. Pasma przenoszenia jest w przybliżeniu płaskie, a jego szerokość wynosi ok. 30 kHz.

Rysunek 4 przedstawia dla kontrastu proces regulacji anemometru dla wzmacnienia regulatora dwa razy większego od wartości optymalnej. W tym przypadku odpowiedź skokowa jest znacznie przeregulowana, z tendencjami do zanikających oscylacji. Szerokość pasma przenoszenia w tym przypadku wynosi ok. 70 kHz, ale jego przebieg nie jest płaski. Wyższe częstotliwości są wzmacnione o ponad 5 dB.

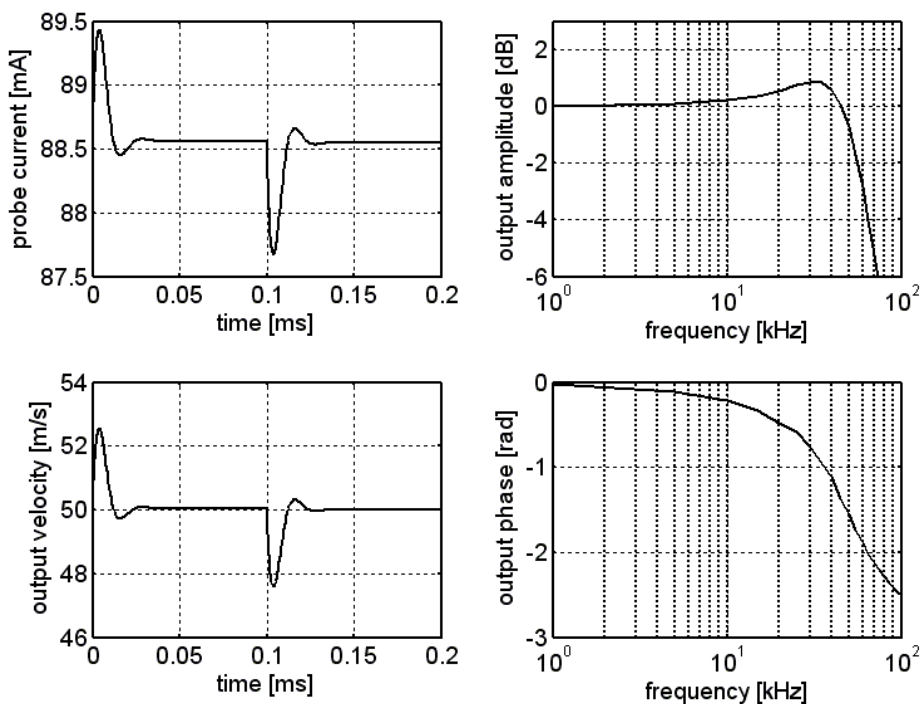
Podobnie proces regulacji przebiega dla doboru stałej czasowej regulatora. Badania wykazały, że wartość tego parametru w mniejszym stopniu wpływa na przebieg odpowiedzi anemometru. Tak więc dobór stałej czasowej regulatora nie jest procesem tak krytycznym, jak dobór jego wzmacnienia.

Rysunek 5 przedstawia proces regulacji anemometru dla dobranych optymalnych parametrów regulatora. W tym przypadku odpowiedź skokowa jest przeregulowana o około 15%, a pasmo przenoszenia jest prawie płaskie, podbicie wyższych częstotliwości nie przekracza 1 dB. Szerokość pasma przenoszenia wynosi ok. 60 kHz. Dla tej częstotliwości przesunięcie fazowe sygnału wynosi ok. 1.9 radiana.

Dla zbadania wpływu amplitudy skokowego wymuszenia napięciowego na przebieg regulacji zastosowano wymuszenie dziesięciokrotnie większe od zastosowanej poprzednio. Rysunek 6 przedstawia proces regulacji anemometru dla dobranych optymalnych parametrów regulatora i amplitudzie wymuszenia 1 mV. Charakter odpowiedzi i pasmo przenoszenia są zbliżone do uzyskanych poprzednio, znacznemu zwiększeniu uległa jedynie amplituda skoku odpowiedzi anemometru. Oznacza to, że dobór amplitudy wymuszenia nie jest parametrem krytycznym w procesie regulacji.



Rys. 4. Proces regulacji anemometru – wzmożenie regulatora większe od optymalnego

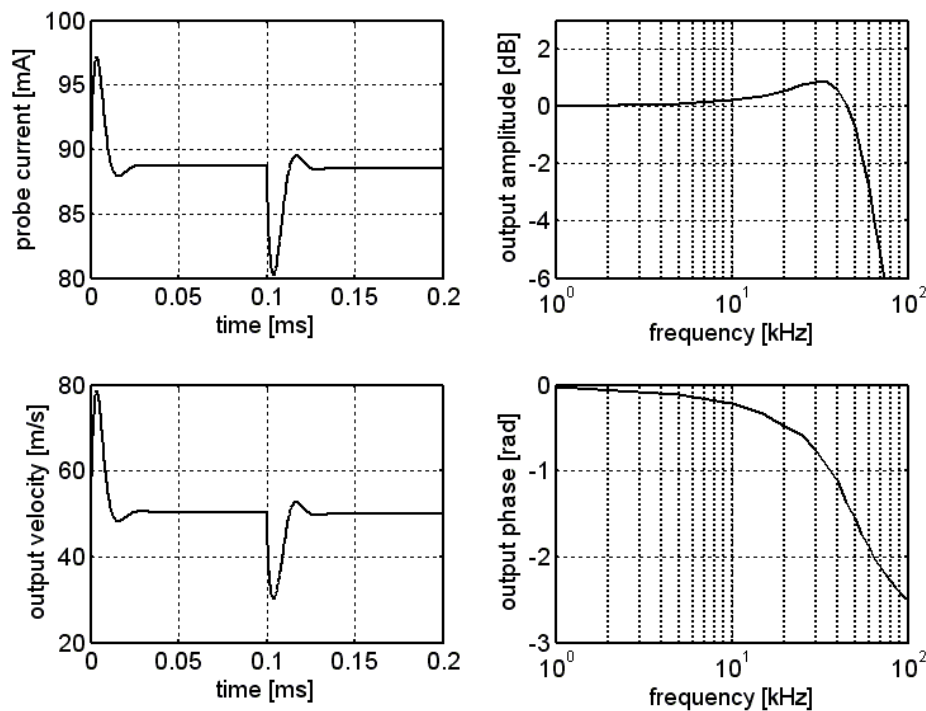


Rys. 5. Proces regulacji anemometru – optymalne parametry regulatora

## 5. Podsumowanie

W pracy opisano model matematyczny anemometru stałotemperaturowego wraz z metodyką prowadzenia badań symulacyjnych, pozwalających na analizę procesu optymalnej regulacji anemometru oraz metod wyznaczania i kształtowania pasma przenoszenia. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych, których celem jest ocena jakości procesu regulacji anemometru na podstawie testu ze skokowym wymuszeniem elektrycznym. W procesie symulacyjnym przeprowadzono optymalną regulację anemometru przy przyjętym współczynniku nagrzania i zadanej prędkości przepływu. Jako sygnał testujący właściwości





Rys. 6. Proces regulacji anemometru – optymalne parametry regulatora, dziesięciokrotnie zwiększona amplituda wymuszenia skokowego napięcia niezrównoważenia

dynamiczne anemometru zastosowano skok napięcia niezrównoważenia. Wzmocnienie i stałą czasową regulatora dobierano tak, aby uzyskać przeregulowanie odpowiedzi układu na poziomie 15% amplitudy maksymalnej. Zgodnie z danymi literaturowymi odpowiada to uzyskaniu optymalnego pasma przenoszenia anemometru przy zadanych warunkach pracy. Stwierdzono, że kluczowym parametrem procesu regulacji pasma jest wzmocnienie regulatora. Wpływ stałej czasowej regulatora na pasmo przenoszenia anemometru jest mniej istotny. Również amplituda zastosowanego wymuszenia napięciowego nie jest parametrem krytycznym.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie w 2017 roku, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

### Literatura

- [1] Freymuth P. *Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers*. Rev. of Sci. Instrum. 1967; 38: 677-681.
- [2] Davis M.R. *The dynamic response of constant resistance anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1970; 3: 15-20.
- [3] Freymuth P. *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1977; 10: 705-710.
- [4] Watmuff J.H. *Investigation of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer*. Exp. Thermal and Fluid Sci. 1995; 11: 117-134.
- [5] Saddoughi S.G., Veeravalli S.V. *Hot-wire anemometry behaviour at very high frequencies*. Meas. Sci. Technol. 1996; 7: 1297-1300.
- [6] Freymuth P. *On higher order dynamics of constant-temperature hot-wire anemometers*. Meas. Sci. Technol. 1998; 9: 534-535.
- [7] Payne S.J. *Unsteady Loss in a High Pressure Turbine Stage*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy at the University of Oxford, Hilary Term, Department of Engineering Science, University of Oxford, 2001 [http://www.robots.ox.ac.uk/~sjp/publns/sjp\\_thesis\\_c4\\_chapter4.pdf](http://www.robots.ox.ac.uk/~sjp/publns/sjp_thesis_c4_chapter4.pdf).
- [8] Li D.J. *Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements*. Meas. Sci. Technol. 2004; 15: 1835-1847.
- [9] Li D.J. *The effect of electronic components on the cut-off frequency of the hot-wire system*. Meas. Sci. Technol. 2005; 16: 766-774.

- [10] Li D.J. *Dynamic response of constant temperature hot-wire system under various perturbations*. Meas. Sci. Technol. 2006; 17: 2665-2675.
- [11] Ligęza P. *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*. Review of Scientific Instruments, vol. 71, 1, 2000.
- [12] Ligęza P. *On unique parameters and unified formal form of hot-wire anemometric sensor model*. Review of Scientific Instruments, vol. 76, 1, 2005.

## **Modeling and computer simulation of the process of regulation of the constant temperature anemometer for measurements in fast changing flows**

### **Abstract**

A typical system for supply a hot-wire flow velocity sensor is a constant-temperature system. It is an electronic automatic control system, that maintains an average temperature of the wire at a constant, preset level. The constant-temperature system consists of a resistance bridge and a regulator working in the feedback loop. In such an arrangement, the current of the sensor is a function of the heat loss from wire to flow, and therefore, indirectly, the function of the measured flow velocity. The constant-temperature anemometer enables the measurement of fast fluctuations in flow, but the frequency bandwidth of the anemometer is a function of the overheat ratio and the flow velocity. The choice of system parameters allows to optimize the frequency bandwidth of the anemometer. Presented mathematical model of the constant-temperature anemometer and research methodology of computer simulations allows analysis of the process of regulation, optimization and determination of the frequency bandwidth of the anemometer. This article is the first part of a series dedicated to the topic of hot-wire anemometric measurements in fast changing flows.

**Keywords:** hot-wire anemometry, mathematical model, computer simulation, frequency bandwidth